

# Метрология

---

Измерения:  
средства измерений, погрешность измерений

# Измерения и значение

## Величины

Результат измерения физической величины – множество значений измеряемой величины вместе с любой другой доступной и существенной информацией.

Измеренное значение – значение величины, полученное в результате измерения.

Пример: 5 раз измеряли диаметра вала. Результаты:  
20,1 мм; 20,2 мм; 19,8 мм; 20,0 мм; 19,9 мм.

Измеренное значение – 20,1 мм.

Результат измерения  $(20,0 \pm 0,1)$  мм.

Хороший результат или нет? Иначе, каково качество проведённых измерений?

Зависит от:

- цели измерений – если мы должны проконтролировать размер  $20_{0}^{0,010}$  – результаты отвратительные 😊
- использованного средства измерений – если мы измеряли диаметр штангенциркулем, то результатам можно верить; если линейкой – то нет.
- ...

# Измерения и значение

## величины

Принятое значение – значение величины, по соглашению приписанное величине для данной цели.

Пример: скорость света в вакууме  $c=299\,792\,458$  м/с, стандартное ускорение свободного падения  $g=9,80\,685$  м/с<sup>2</sup> (используют в весах).

Истинное значение величины – значение величины, которое соответствует определению измеряемой величины.

Опорное значение – значение величины, которое используют в качестве основы для сопоставления со значениями величины того же рода. Может быть истинным или принятым.

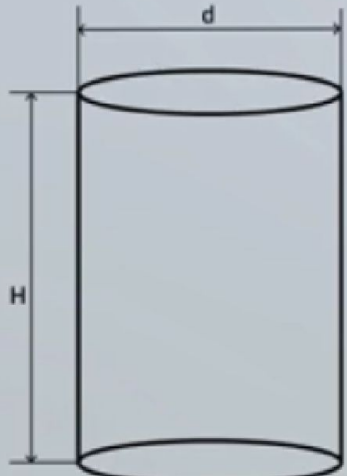
Пример 1: проводим опыт по измерению скорости света (например, чтобы проверить характеристики наших приборов). Опорное значение – принятое, т.е. ответ известен.

Пример 2: взвешиваем камень на весах. Опорное значение – истинное, т.е. ответ не известен.

Действительное значение величины – значение величины, полученное экспериментальным путём и настолько близкое к истинному значению, что в поставленной измерительной задаче может быть использовано вместо него.

# Модель измерений

Измерение объема круглого цилиндра



Модель (уравнение) измерений

$$V = \frac{\pi \cdot d^2}{4} \cdot H$$

где  $d, H$  – входные величины,  
 $V$  – выходная величина.

При измерении существуют:

- входные величины – те, которые мы можем измерить
- выходные величины – те, которые мы должны определить
- модель измерений – уравнение (система уравнений), связывающая входные и выходные величины.

Конечно, объем цилиндра можно измерить другими способами – будут другие модели!

Пороговое несоответствие – несоответствие модели и объекта измерения (например, цилиндр может оказаться изогнутым или не круглым).

Если мы измеряем всё абсолютно точно, то истинное значение = объем тела ,  
действительное значение = объем цилиндра.

# Погрешность измерений

Погрешность результата измерения — разность между измеренным и опорным значением величины.

Погрешность средства измерения – разность между показанием СИ и опорным значением измеряемой величины.

**Формы представления погрешности:**

Абсолютная погрешность – погрешность, выраженная в единицах измеряемой величины.

Относительная погрешность — отношение абсолютной погрешности к опорному значению измеряемой величины. Безразмерное значение, часто выражается в %.

Приведённая погрешность (СИ) – отношение абсолютной погрешности к нормирующему значению (максимальное значение шкалы СИ или разность максимального и минимального значений шкалы СИ).

Пример: истинный размер детали = 100 мм, измеренный размер = 99,9 мм, измеряли ШЦ-1-150 (измеряет размеры от 0 до 150 мм с погрешностью 0,1).

Абсолютная погрешность результата =  $100 \text{ мм} - 99,9 \text{ мм} = 0,1 \text{ мм}$

Относительная погрешность результата =  $0,1 \text{ мм} / 100 \text{ мм} = 0,001 = 0,1\%$

Приведённая погрешность СИ =  $0,1 \text{ мм} / 150 \text{ мм} = 0,000666... = 0,0666\%$



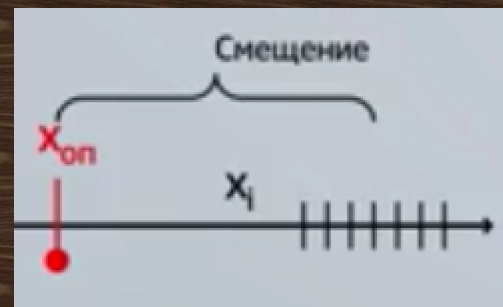
# Погрешность измерений

Классификация погрешностей результата измерений основана на их проявлении при повторяющихся измерениях. Возможны три ситуации:

1. Рассеяние. Получаем измеренные значения вблизи опорного значения. Возможны отклонения в обе стороны. Со временем величина и знак отклонений не изменяется.



2. Смещение. Все измеренные значения удалены от опорного значения, причём в одну сторону.



3. Выброс. Одно из измеренных значений удалено от большинства других.



# Погрешность измерений

Классификация погрешностей результата измерений основана на их проявлении при повторяющихся измерениях:

1. Случайная погрешность = составляющая погрешности, изменяющаяся случайным образом при повторных измерениях. Объясняет рассеяние.



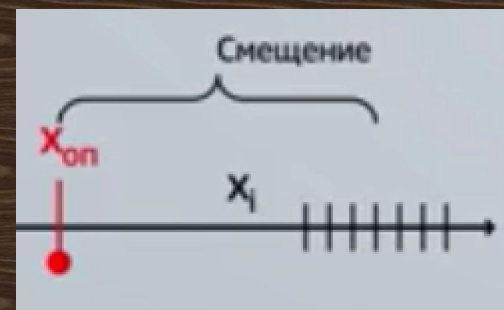
Случайную погрешность каждого измерения мы не можем или не хотим устранять (слишком дорого); проще выполнить несколько измерений – это её уменьшит.

Пример: во время измерений кто-то ходит по лаборатории, колышется пол, стол, и стрелка измерительного прибора.

# Погрешность измерений

Классификация погрешностей результата измерений основана на их проявлении при повторяющихся измерениях:

2. Систематическая погрешность = составляющая, остающаяся постоянной или закономерно изменяющаяся при повторных измерениях одной и той же величины. Объясняет смещение.



Систематическую погрешность обычно можно устранить или значительно уменьшить настройкой приборов, применением более точных методов расчёта, точных математических моделей и т.п. Она не зависит от числа измерений.

Пример: в расчётах принято  $\pi=3$  вместо  $\pi=3,1415926\dots$

Поправка – значение величины, вводимое в неисправленный результат измерения с целью исключения составляющих систематической погрешности.



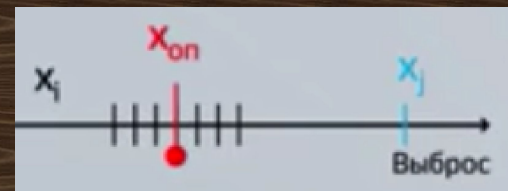
# Погрешность измерений

Классификация погрешностей результата измерений основана на их проявлении при повторяющихся измерениях:

3. Грубая погрешность (промах) = погрешность, существенно превышающая определяемые объективными условиями случайную и систематическую погрешности.

**Грубая погрешность не входит в составляющие погрешности измерений, т.е. такой результат следует отбросить!**

Грубая погрешность объясняет выбросы.



Грубая погрешность вызвана ошибкой человека или неисправностью прибора.

Пример: результаты измерений диаметра вала записывают ручкой на бумагу. Вместо 91,23 мм было записано 81,23 мм.

# Систематические погрешности:

## Постоянные погрешности –

погрешности, которые в течение длительного времени, например, в течение времени выполнения всего ряда измерений, остаются постоянными (или - неизменными). Они встречаются наиболее часто.



## Прогрессирующие погрешности –

непрерывно возрастающие или убывающие погрешности.



# Систематические погрешности:

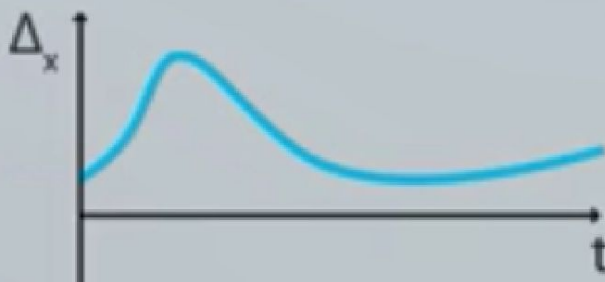
## Периодические погрешности –

погрешности, значение которых является периодической функцией времени или перемещения указателя измерительного прибора.



## Погрешности, изменяющиеся по сложному закону

происходят вследствие совместного действия нескольких систематических погрешностей.



# Систематические погрешности:

Систематическая погрешность складывается из трёх составляющих:

1. Погрешность метода измерений вызвана различиями модели и реального объекта. Пример – мы определяли объем тела в форме цилиндра, а оно было конусом.
2. Инструментальная погрешность вызвана погрешностями применяемых СИ.
3. Неисключённая систематическая погрешность – систематическая погрешность, которая остаётся после введения всех поправок.



# инструментальная

## погрешность:

Вызвана свойствами СИ и отклонением условий измерения от нормальных.

Национальный подход: Влияющая величина не влияет на измеряемую величину, а влияет на показания СИ.

Пример 1: определяем массу тела взвешиванием. Весы фактически определяют силу тяжести и по ней через стандартное ускорение свободного падения  $g=9,80685 \text{ м/с}^2$  – массу тела. Но  $g$  зависит от широты местности и высоты над уровнем моря. Масса от широты и высоты не зависит, т.е. эти величины – влияющие.

Пример 2: измеряем длину тела линейкой. Расстояние между штрихами линейки изменяется с температурой, размер тела тоже. Температура – не влияющая величина.

Международный подход: Влияющая величина не является измеряемой величиной, но влияет на результаты измерения.

Пример 2: температура – влияющая величина.

# инструментальная

## погрешность:

Условия измерения – совокупность влияющих величин.

Бывают:

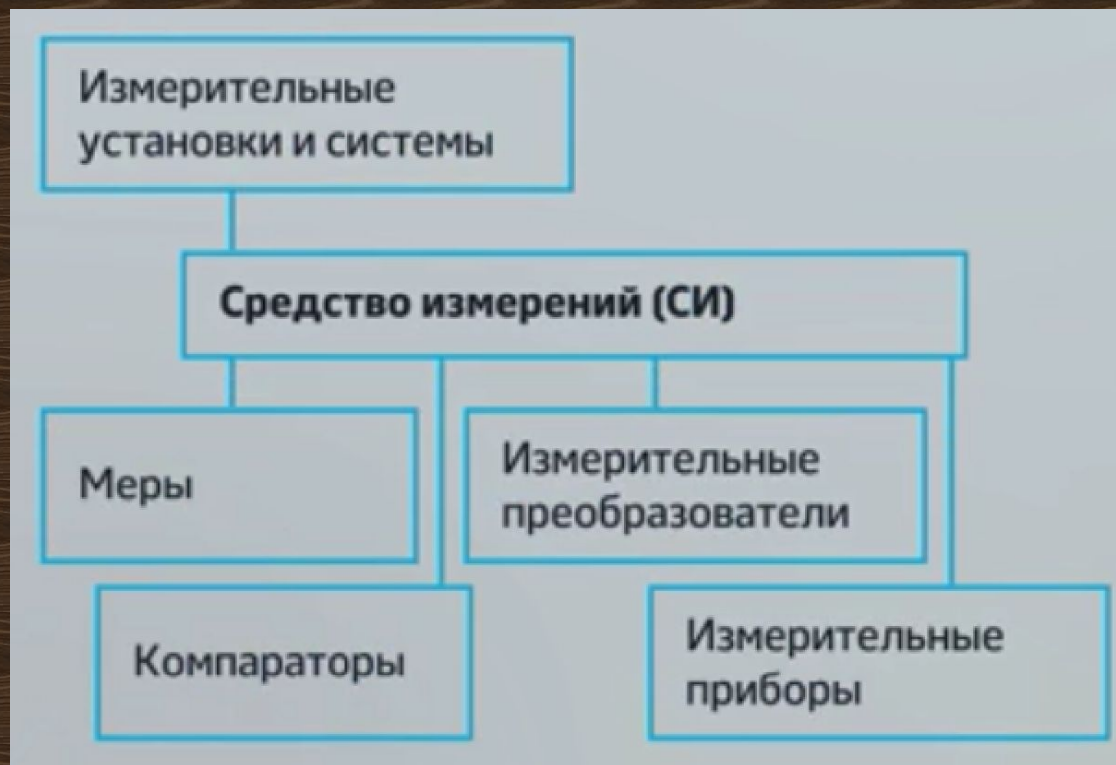
- нормальные – предписанные для оценивания характеристик СИ и для сравнения результатов измерений. Погрешность СИ в н.у. будет минимальной, она называется основной погрешностью СИ.
- нормированные (рабочие) – условия, в которых СИ работает по назначению. Погрешность СИ в рабочих условиях называется дополнительной погрешностью СИ.
- предельные – условия, которые СИ может выдержать без повреждения (ухудшения метрологических характеристик). СИ там не используют для измерений, а хранят, перевозят...

# Средства измерений

Тип средства измерения – совокупность СИ одного и того же назначения, основанных на одном и том же принципе измерения, имеющих одинаковую конструкцию и изготовленных по одинаковой документации. Могут иметь различные модификации.

Метрологические характеристики СИ – характеристики, влияющие на результат. Устанавливаются нормативной документацией на тип СИ.

# Средства измерений





# Средства измерений

## 1. Мера

РМГ 29-2013, 6.11 мера (материальная):

Средство измерений, которое воспроизводит в процессе использования или постоянно хранит величины одного или более данных родов, с присписанными им значениями.



Пример меры – гиря и линейка.

Многозначная мера даёт несколько величин, например, линейка с сантиметровыми и миллиметровыми штрихами.

Магазины мер – конструктивно объединены.

АСО – имеет сопроводительную документацию, выданную соответствующей организацией. Пример СО – СО свойств (вещество или соединение известного состава).

# Средства измерений

## 2. Компаратор

РМГ 29-2013, 6.16 компаратор:

Средство измерений, предназначенное для сличения мер однородных величин, измерительных преобразователей и измерительных приборов.

## 3. Измерительный преобразователь

РМГ 29-2013, 6.12

измерительный преобразователь; ИП:

Средство измерений или его часть, служащее для получения и преобразования информации об измеряемой величине в форму, удобную для обработки, хранения, дальнейших преобразований, индикации или передачи.

Пример компаратора – весы рычажные.

Пример преобразователя – датчики (температуры, давления...), которые преобразуют измеряемую величину в электрический ток или напряжение.

Измерительные преобразователи бывают аналоговыми, ЦАП и АЦП.

# Средства измерений

## 4. Измерительные приборы

РМГ 29-2013, 6.5

измерительный прибор:

Средство измерений, предназначенное для выработки сигнала измерительной информации в форме, доступной для непосредственного восприятия.

## 5. Измерительные установки и системы

РМГ 29-2013, 6.4

установка (измерительная):

Совокупность функционально объединенных и **расположенных в одном месте мер**, измерительных приборов, измерительных преобразователей и других устройств, предназначенная для измерений одной или нескольких величин.

РМГ 29-2013, 6.3

измерительная система; ИС:

Совокупность средств измерений и других средств измерительной техники, размещенных **в разных точках объекта измерения**, функционально объединенных с целью измерений одной или нескольких величин, свойственных этому объекту.



# Измерительные приборы

Диапазон показаний — область шкалы, ограниченная начальным и конечным значениями (0..10 кПа).

Цена деления шкалы — разность значений величины, соответствующих двум соседним отметкам шкалы (0,2 кПа).

Длина деления шкалы — расстояние между двумя соседними отметками шкалы. Чем больше длина деления шкалы, тем комфортнее воспринимается наблюдателем измерительная информация. (Ширина прямоугольника, мм)





# Измерительные приборы

Чувствительность измерительного прибора — отношение изменения сигнала на выходе измерительного прибора к вызывающему его изменению измеряемой величины (абсолютному или относительному).

Пример: измеряем вал диаметром 100 мм;  
изменение диаметра на 0,01 мм  
вызывает перемещение стрелки на 10 мм

абсолютная чувствительность (мм/изм.величина):

$$10 \text{ мм} / 0,01 \text{ мм} = 1000$$

относительная чувствительность (мм):

$$10 \text{ мм} / (0,01 \text{ мм} / 100 \text{ мм}) = 100 \text{ 000 мм}$$

На разных участках шкалы чувствительность может быть разной!

# Измерительные приборы

Порог чувствительности измерительного прибора — минимальное значение измеряемой величины, с которого может начинаться её измерение данным СИ.

Пример: весы, цена деления 1 г. Ставим гирю 1 г – ничего, ставим 2 г – ничего, ставим 5 г – стрелка прыгает сразу на 5.

Разрешение – наименьшее изменение измеряемой величины, которое заметно изменяет показания прибора. Свойство конструкции прибора.

Разрешающая способность прибора – наименьшая разность между показаниями, которая может быть заметно различима. Свойство шкалы прибора.

Пример: с помощью СИ можно различить значения измеряемой величины, если оно не меньше, чем максимум (разрешения прибора и разрешающей способности прибора).

# Измерительные приборы

Вариация показаний — алгебраическая разность наибольшего и наименьшего результатов при многократном измерении одной и той же величины в неизменных условиях (в одной и той же точке).

Градуировочная характеристика прибора — это зависимость между значениями величин на выходе и входе средства измерений, представленная в виде формулы, таблицы или графика. Может быть использована для уточнения результатов измерения.

Измерительное усилие – усилие, создаваемое по линии измерения и вызывающего деформацию в месте контакта измерительного наконечника с поверхностью детали.

# Измерительные приборы

Класс точности – обобщённая характеристика типа СИ, отражающая их уровень точности.

ГОСТ 8.401. Классы точности СИ

Наносится на шкалу или корпус прибора, позволяет в большинстве случаев не заглядывать техническую документацию прибора.



$\Delta$  – абсолютная погрешность,  $x$  – показание СИ, FS – диапазон измерения (разница максимума и минимума шкалы)

- класс точности в кружке (мультипликативная погрешность)

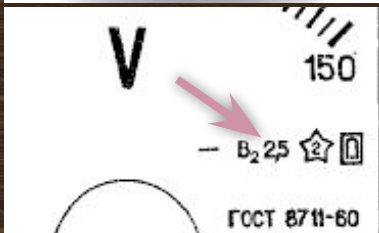
$$\Delta = x * (\text{класс точности}) / (100\%)$$

- класс точности без кружки (аддитивная погрешность)

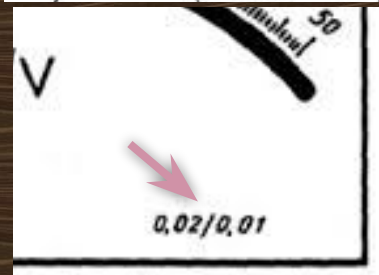
$$\Delta = FS * (\text{класс точности}) / (100\%)$$

- класс точности в виде дроби А/Б (комбинированная погрешность)

$$\Delta = x * (A-B) / 100\% + FS * B / 100\%$$



ГОСТ 8711-60





# Измерительные приборы

Класс точности выбирают из стандартного ряда чисел:

1 1,5 2 2,5 (4) 5 (6)

(в скобках – применяются редко)

Указанные числа можно делить или умножать на 10, 100, 1000 и т.д.

На лицевой панели миллиамперметра нанесено обозначение класса точности в виде **2,5**. Результат измерения  $I = 75$  мА. Нижний предел измерения шкалы 0, верхний 100 мА. Определить абсолютную погрешности измерения и записать результат измерения.

# Измерительные приборы

Решение:

- абсолютная погрешность  $75 \text{ мА} * 2,5\% = 1,875 \text{ мА}$
  - погрешность должна быть выражена 1-2 значащими цифрами. Если первая цифра 3 и больше, то погрешность обозначаем одной цифрой  
абсолютная погрешность = 1,9 мА
  - число десятичных знаков в измеренной величине и в погрешности должно совпадать
- результат измерения =  $(75,0 \pm 1,9) \text{ мА}$

# Измерительные приборы

Задача:

Миллиамперметр, класс точности которого обозначен **1,5**, имеет диапазон измерений 0 - 300 мкА. Определить диапазон значений тока, в котором относительная погрешность измерений не превысит 5 %.

# Измерительные приборы

Решение:

- диапазон измерения  $FS = (300 - 0) \text{ мкА} = 300 \text{ мкА}$ .
- абсолютная погрешность  $\Delta = 1,5\% * FS = 4,5 \text{ мкА}$
- относительная погрешность  $\delta = 4,5 / I \leq 5\%$
- измеренное значение, при котором выполняется неравенство:  $I \Rightarrow 4,5 \text{ мкА} / 5\%$  или  $I \Rightarrow 90 \text{ мкА}$ .



# Измерительные приборы

Задача:

Основная приведенная погрешность амперметра с максимальным отклонением стрелки 5 А, равна 0,5%. Оценить абсолютную и относительную погрешности измерения, если показание прибора равно 1 А, а нулевая отметка находится на краю шкалы, зависимость абсолютной погрешности от измеренного значения носит аддитивный характер. Записать результат измерения тока. Определить класс точности амперметра.

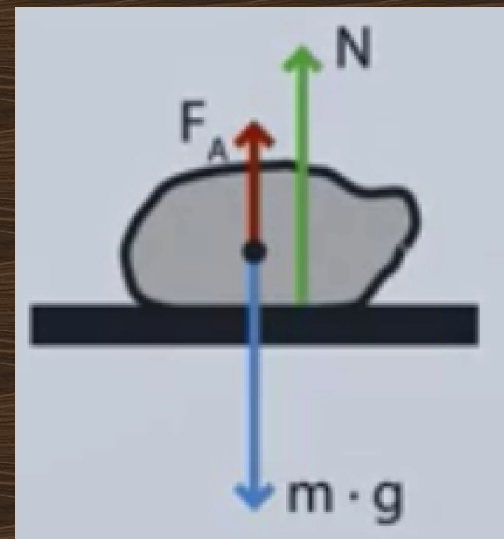
# Измерительные приборы

Решение:

- диапазон измерения  $FS = 5 \text{ A}$ .
- абсолютная погрешность  $\Delta = 0,5\% * FS = 0,025 \text{ A}$
- относительная погрешность  $\delta = \Delta / 1 \text{ A} = 2,5\%$
- результат измерений:  
первая значащая цифра в абсолютной погрешности = 2, т. е. погрешность приводим с двумя значащими цифрами:  $I = (1,000 \pm 0,025) \text{ A}$
- класс точности (аддитивная погрешность) =  $100\% * \Delta / FS = 100\% * 0,025 \text{ A} / 5 \text{ A} = 0,5 \%$ .  
Поскольку 5 присутствует в стандартном ряду, округлять вверх не требуется. Пишем на приборе 0,5 (без кружка).

# Измерительные приборы

Задача:



На пружинных весах взвешивают вещество с плотностью  $0,4 \text{ г/см}^3$ . Вычислите (в процентах) относительную систематическую погрешность взвешивания, обусловленную действием выталкивающей силы Архимеда. Плотность воздуха  $1,29 \text{ кг/м}^3$ .

# Измерительные приборы

Решение:

- Весы измеряют  $N$ .
- $0,4 \text{ г/см}^3 = 400 \text{ кг/м}^3$ .
- Пусть тело имеет объем  $V$ , тогда:  
$$F_A = 1,29 * V * g$$
$$mg = 400 * V * g$$
$$N = mg - F_A = 398,71 * V * g$$
- абсолютная систематическая погрешность  $\Delta = F_A$
- относительная погрешность  $\delta = \Delta / mg = 1,29 / 400 * 100\% = 0,3 \%$